

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Provádění nedestructivní kontroly a hodnocení svarů ocelových konstrukcí

Execution of Nondestructive Testing and Classification of Welded Joints for Steel
Structures

Student:

Antonín Židek

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Sondel, Ph.D.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání bakalářské práce

Student: **Antonín Žídek**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Provádění nedestruktivní kontroly a hodnocení svarů ocelových konstrukcí**
Execution of Nondestructive Testing and Classification of Welded Joints for Steel Structures

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii provádění nedestruktivních kontrol při výrobě OK podle ČSN EN 1090.
2. Zpracujte studii vybraných metod nedestruktivní kontroly.
3. Popište kritéria přípustnosti pro svařované dílce podle ČSN EN 1090.
4. Na zvoleném svarovém spoji ověřte vybrané metody NDT.

Seznam doporučené odborné literatury:

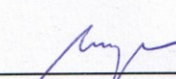
KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír; HAJDÍK Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*. Vyd. 1. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., VŠB-Technická Univerzita, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2005. 136 s. ISBN 80-248-0870-6.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Sondel, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013
Datum odevzdání: 19.05.2014




Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

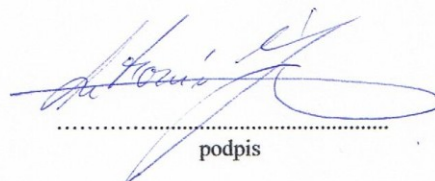
V Ostravě
18. 5. 2014

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užitá díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním system VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 18.5.2014



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Antonín Židek

Adresa trvalého pobytu autora práce: Karla Štěcha 18, České Budějovice

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

ŽÍDEK, A. *Provádění nedestruktivní kontroly a hodnocení svarů ocelových konstrukcí: bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2014, s.

Vedoucí práce: Ing. Martin Sondel, Ph.D.

V této bakalářské práci se provádí nedestruktivní zkoušky pracovního vzorku z materiálu S355 JR. V první části je obsažen předmět normy ČSN EN 1090-2, kontrola po svaření, rozsah kontrol, studie svařitelnosti uhlíkových ocelí a seznam všech možných povrchových a vnitřních vad (bodové, plošné a prostorové). Druhá část bakalářské práce je věnována samotnému zkoušení a vyhodnocování pracovního vzorku. Dle aktuálních norem jsou prováděny a vyhodnocovány všechny použité zkoušky (vizuální, penetrační, magnetická prášková, prozařovací a ultrazvuková).

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

ŽÍDEK, A. *Execution of nondestructive testing and classification of welded joints for steel structures: Bachelor thesis*. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2014, p

Supervisor: Ing. Martin Sondel, Ph.D.

In this bachelor work is carried out non-destructive testing working sample of the material S355 JR. The first section contains an object of the CSN EN 1090-2, inspection of the weld, range checks, study the weldability of carbon steel and a list of all possible surface and internal defects (point, area, and spatial). The second part of the bachelor thesis is devoted to the testing and evaluation of work sample. According to the current standards are implemented and evaluated all the tests (visual, penetrant, magnetic particle, radiographic and ultrasound).

Obsah

	Strana
Seznam použitých značek a symbolů	9
1 Úvod	11
2 Teoretická část	11
2.1 Předmět normy ČSN EN 1090-2	11
2.2 Kontrola po sváření	13
2.3 Rozsah kontrol	14
2.4 Svařitelnost uhlíkových ocelí	16
2.5 Vady ve svarech	18
3 Praktická část	20
3.1 Pracovní vzorek	20
3.2 Vizuální kontrola VT	21
3.3 Penetrační metoda PT	24
3.4 Magnetická prášková metoda MT	27
3.5 Prozařovací (radiologická) metoda RT	29
3.6 Ultrazvuková metoda UT	36
Závěr	38
Použitá literatura	40
Seznam příloh	41

Seznam tabulek: Strana

Tabulka 1: Minimální časové prodlevy	13
Tabulka 2: Rozsah doplňujících NDT	15
Tabulka 3: Přehled mezních tloušťek a uhlíkových ekvivalentů uhlíkových ocelí podle IIW	17
Tabulka 4: Mezní hodnoty vad	23
Tabulka 5: Stupně přípustnosti pro vnitřní indikace u tupých svarů	35

Seznam obrázků: Strana

Obr. 1.1: Závislost tvrdosti svarového spoje na obsahu uhlíku v oceli a na procentu martenzitu v struktuře TOO	17
Obr. 2.1: Kořen pracovního vzorku	20
Obr. 3.1: Měrka sloužící k měření rozměrů vady při vizuální kontrole	22
Obr. 3.2: Detekce vady č. 517 (vadné napojení)	24
Obr. 4.1: Aplikace penetrantu na očištěný zkušební vzorek	25
Obr. 4.2: Aplikace vývojky na zkušební vzorek	26
Obr. 5.1: Aplikace bílého základu na povrch svaru	28
Obr. 5.2: Použití spreje s olejem s kovovým práškem za účinku působení magnetu	28
Obr. 6.1: Volba napětí na rentgence a zdroj záření	30
Obr. 6.2: Tabulka pro zjištění expoziční doby	31
Obr. 6.3: Zadané údaje na řídicím panelu pro lampu Andrex smart 200	32
Obr. 6.4: Zařízení pro změření zčernání rentgenového filmu	32
Obr. 6.5: Měrky a olověná písmena na pracovním vzorku	33

Obr. 6.6: Rentgenový snímek (levá část)	34
Obr. 6.7: Rentgenový snímek (pravá část)	34
Obr. 7.1: Detekce chyby ultrazvukem	37

Seznam použitých značek a symbolů:

VŠB TUO Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava

ČSN EN česká technická norma, která přejímá evropskou normu

ČSN EN ISO česká technická norma, která zavádí do soustavy českých norem evropskou normu identickou s mezinárodní normou

Oceli zařazené ve skupině 1 a tedy označeny podle způsobu použití, mechanických a fyzikálních vlastností:

S konstrukční oceli

P oceli pro tlakové nádoby a zařízení

E oceli na potrubí

L oceli na strojní součásti

Prvky SI soustavy

C Uhlík

Mn Mangan

Si Křemík

P Fosfor

S Síra

Obecné značky a symboly

TOO Tepelně ovlivněná oblast

WPS kvalifikovaná specializace postupu svařování

EXC třída provedení svaru

HV tvrdost podle Vickerse

IIW International Institute of Welding

MPa Mega Pascal

teplota interpass	mezihousesnková teplota
Obr	obrázek
Tab	tabulka
PF	poloha elektrody (svislá nahoru)
135 (MAG)	Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
St.	Stupeň
m	minuta
s	sekunda
cm	centimetr
mm	milimetr
f	fokus
l	délka
t	tloušťka
kJ	kilojoule
Q	vnesené teplo
EXC	třída provedení

1 Úvod

V této bakalářské práci se budu zabývat prováděním nedestruktivní kontroly a hodnocení svarových konstrukcí z uhlíkové oceli. Ocelové konstrukce jsou prováděny dle normy ČSN EN 1090-2 a nedestruktivní zkoušky jsou provedeny dle aktuálních prováděcích a vyhodnocovacích norem. Jako pracovní vzorek poslouží svařená deska (materiál S355 JR) poskytnutá výrobcem ocelových konstrukcí. K úplnému vyhodnocení vad ve svaru bude použito několik nedestruktivních zkoušek, pro hodnocení daného typu svarového spoje.

V teoretické části je prostor věnovaný pro předmět normy ČSN EN 1090-2+A1, kontrolu po svaření, rozsah kontrol, svařitelnost uhlíkových ocelí a probrání všech druhů povrchových i vnitřních vad se kterými se při hodnocení svaru všemi metodami zkoušení můžeme setkat.

V praktické části se věnuji samotnému zkoušení a vyhodnocování pracovního vzorku s pomocí několika metod, typických pro NDT zkoušení. Popis a seznámení se všemi použitými nedestruktivními zkouškami. Vše je doplněno fotografickou dokumentací pro větší objasnění metod. Jedná se o vizuální metodu VT, penetrační metodu PT, magnetickou práškovou metodu MT, prozařovací (radiologickou) metodu RT a ultrazvukovou metodu UT.

2 Teoretická část

2.1 Předmět normy ČSN EN 1090-2:

„Slouží pro provádění ocelových konstrukcí, jejich konstrukční detaily, zásady pro výrobu a tolerance.

- ze za tepla válcovaných výrobků z konstrukčních ocelí včetně S690;
- z tenkostěnných za studena tvarovaných prvků a plošných průřezů včetně S700;
- z výrobků z korozivzdorných ocelí za tepla zhotovených a za studena tvarovaných austenitických, austeniticko-feritických a feritických ocelí;

- z výrobků za tepla zhotovených a za studena tvarovaných konstrukčních dutých průřezů včetně výrobků vyrobených na zakázku a včetně průřezů vyrobených svařováním.

Tuto evropskou normu lze rovněž použít pro konstrukční oceli do S960, za předpokladu, že podmínky pro provádění jsou ověřeny kritérií spolehlivosti a jsou stanoveny další potřebné požadavky. Norma stanoví požadavky nezávisle na typu a rozměru ocelové konstrukce (např. pozemní stavby, mosty, plnostěnné nebo příhradové dílce), včetně konstrukcí namáhaných na únavu nebo seismickým zatížením. Požadavky jsou vyjádřeny třídami provedení.

Norma se vztahuje na konstrukce navržené podle příslušné části EN 1993, na prvky a plošné průřezy, jak je uvedeno v EN 1993-1-3. Mimo jiné je tato norma zaměřena i na ocelové dílce spřažených ocelobetonových konstrukcí navržených podle příslušných částí EN 1994.

Použití pro konstrukce navržené podle jiných pravidel za předpokladu, že podmínky pro provádění jsou s nimi v souladu a jsou stanoveny další potřebné požadavky.

Obsahuje zásady pro metody a provádění NDT zkoušek, což je jedna z hlavních operací při výrobě svařovaných konstrukcí.“ [1]

2.2 Kontrola po svaření

Časové prodlevy

„Následné NDT svarů nesmí být provedeny dříve než po minimální časové prodlevě po svařování, uvedené v tabulce 1.“ [1]

Tabulka 1: Minimální časové prodlevy [1]

Rozměr svaru (mm) ^a	Vnesené teplo Q (kJ/mm) ^b	Časová prodleva (v hodinách) ^c	
		S235 až A1 > S460 < A1	A1 > nad S460 < A1
a nebo s ≤ 6	Všechno	Do vychladnutí	24
6 < a nebo s ≤ 12	≤ 3	8	24
	> 3	16	40
a nebo s > 12	≤ 3	16	40
	A1 > 3	24	48 < A1

^a Rozměr se vztahuje k jmenovité tloušťce a koutového svaru nebo k jmenovité tloušťce materiálu s plně provařeného tupého svaru. Pro jednotlivé částečně provařené tupé svary je kritériem jmenovitá hloubka svaru a, ale pro dvojice částečně provařených současně svařovaných tupých svarů je to součet tloušťek svarů a.

^b Vnesené teplo Q se vypočítá v souladu s kapitolou 19 v EN 1011-1:1998

^c Čas mezi ukončením svaru a provedením NDT se musí uvést v protokolu NDT. V případě „do vychladnutí“ to bude potom, kdy svar je tak vychladlý, aby se mohla provést NDT.

2.3 Rozsah kontrol

„Rozsah NDT zahrnuje jak zkoušení povrchu tak zkoušení vnitřních vad, je-li proveditelné.

Všechny svary se musí vizuálně kontrolovat po celé délce. Jestliže je při kontrole povrchu podezření na vadu, musí se na kontrolovaném svaru provést kapilární nebo magnetická prášková zkouška. Pro svary EXC1 se nepožadují žádné doplňující NDT, zatím co pro svary EXC2, EXC3 a EXC4 je rozsah doplňujících NDT stanoven dále.

Pokud je stanoveno, že svařování ve výrobě podle WPS dosahuje požadavků na jakost, požadovaný rozsah doplňujících NDT musí být v souladu s tabulkou 2 u dalších spojů svařených podle WPS, s kterými se má zacházet jako s jednou průběžnou kontrolní dávkou.

Jestliže kontrola odkryje svarové defekty na kontrolované délce větší než požadavky stanovené v kritériu přípustnosti, kontrola se musí provést na dvou kontrolovaných délkách, každá z jedné strany délky, kde byl zjištěn defekt. Jestliže kontrola z jedné nebo z druhé strany ukáže neshodné výsledky, musí se provést šetření, aby se zjistily příčiny.

Účelem kontrol podle tabulky 2 je zjištění, zda probíhající výroba produkuje vyhovující svary.“ [1]

Tabulka 2: Rozsah doplňujících NDT [1]

Typ svaru	Dílenské nebo montážní svary		
	EXC2	EXC3	EXC4
Příčné tupé svary nebo částečně provařené tupé svary ve spojích s tahovým napětím: $U \geq 0,5$ $U < 0,5$	10 % 0 %	20 % 10 %	100 % 50 %
Příčné tupé svary a částečně provařené tupé svary: v křížových spojích v T spojích	10 % 5 %	20 % 10 %	100 % 50 %
Příčné koutové svary v tahu nebo smyku: $s \geq 12 \text{ mm}$ nebo $t \geq 20 \text{ mm}$	5 % 0 %	10 % 5 %	100 % 50 %
A ₁ Plně provařené svary mezi stojinou a horní pásnicí jeřábových drah	10 %	20 %	100 %
Ostatní podélné svary a svary výztuh	0 %	5 %	10 % < A ₁
<p>Poznámka 1 Podélné svary jsou ty, které jsou rovnoběžné s osou dílce. Všechny ostatní se považují za příčné svary.</p> <p>Poznámka 2 U = stupeň využití pro svary pro kvazistatická zatížení, $U = E_d / R_d$, kde E_d je největší účinek zatížení svaru a R_d je únosnost svaru v mezním stavu únosnosti.</p> <p>Poznámka 3 Značka a je tloušťka svaru a t je tloušťka tlustšího spojovaného materiálu.</p>			

2.4 Svařitelnost uhlíkových ocelí

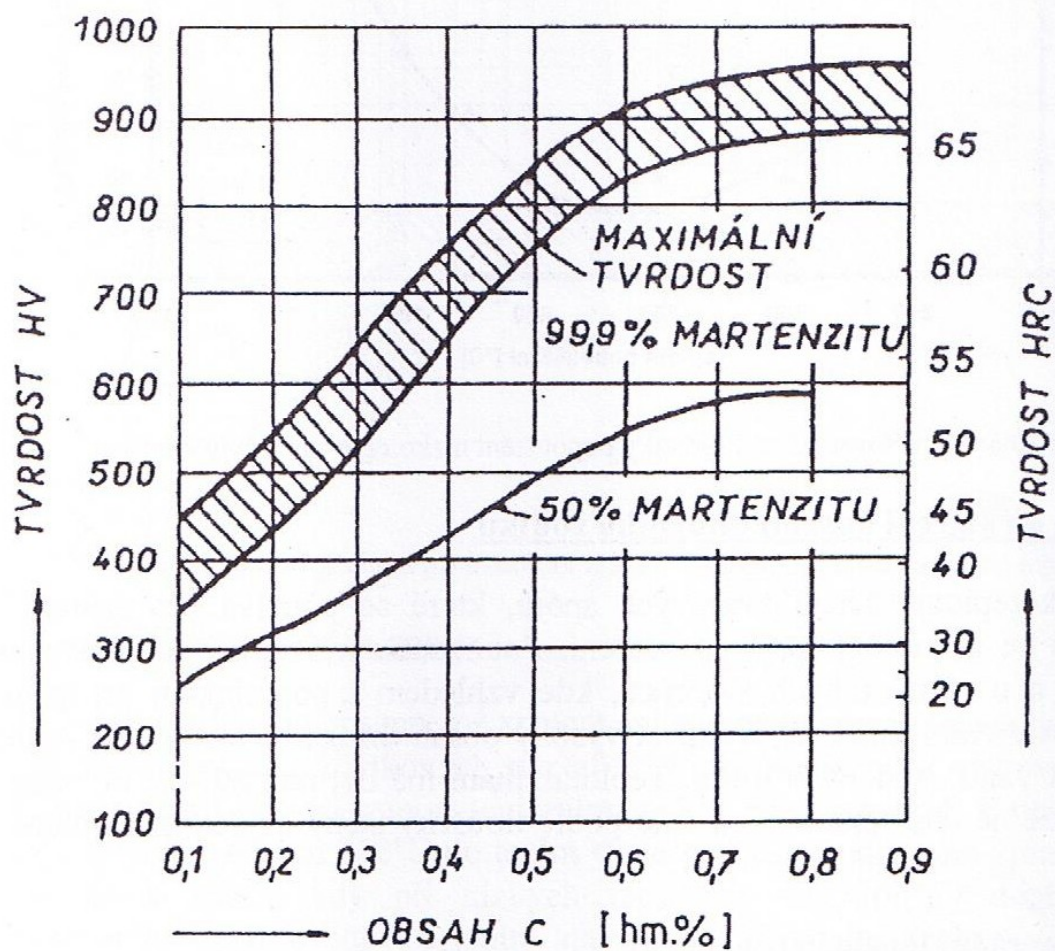
Z důvodu hodnocení svarového spoje uhlíkových konstrukčních ocelí uvádím studii těchto ocelí.

„Uhlíkové oceli byly v původních ČSN normách zařazeny do tříd 10, 11 12. Podle ČSN EN 10027-1 jsou zařazeny ve skupině 1 a tedy označeny podle způsobu použití, mechanických a fyzikálních vlastností (symboly S, P, L, E atd.). Svařitelnost uhlíkových ocelí je ovlivňována především jejich chemickým složením. Výrobci ocelí obvykle garantují u uhlíkových ocelí pouze obsahy C, Mn, Si, P a S. Na svařitelnost uhlíkových ocelí má největší vliv především obsah uhlíku. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku se sice zvyšuje jejich mez pevnosti, mez kluzu a tvrdost, ale jejich plastické vlastnosti se snižují. S rostoucím obsahem uhlíku se také zvyšuje náchylnost uhlíkových ocelí k zakalení při svařování. Současně se zvyšuje náchylnost na vznik studených trhlin, především v TOO svarového spoje.“ [2]

Pracovní vzorek S355 JR podle tloušťky obsahuje C = 0,24%. Zbytek prvků:

- Mn = 1,6 %;
- Si = 0,55 %;
- P = 0,035 %;
- S = 0,035 %;
- Cu² = 0,55 %;
- N¹ = 0,012 %;

„Závislost tvrdosti a procenta martenzitu ve struktuře TOO svarového spoje na obsahu uhlíku v oceli udává obr. 1.1. Z této závislosti bylo také stanoveno kritérium maximální přípustné tvrdosti v TOO svarového spoje uhlíkové oceli 350 HV. Odpovídá obsahu uhlíku v oceli 0,25 % a 50 % obsahu martenzitu ve struktuře.“ [2]



Obr. 1.1: Závislost tvrdosti svarového spoje na obsahu uhlíku v oceli a na procentu martenzitu v struktuře TOO [2]

„Z uvedených důvodů je proto obsah uhlíku ve svařitelných ocelích omezován hodnotou $C \leq 0,25 \%$. Při tomto obsahu uhlíku nemusíme obvykle svarové spoje uhlíkových ocelí menších tlouštěk předehřívat. Materiály IIW například doporučují nepředehřívat svarové spoje uhlíkových ocelí s mezí pevnosti do 700 MPa, při splnění kritérií, tab. 3.“ [2]

Tabulka 3: Přehled mezních tlouštěk a uhlíkových ekvivalentů ekvivalentů uhlíkových ocelí podle IIW [2]

tloušťka svaru S [mm]	obsah C [%]	$C_{E\text{ IIW}}$
$S \leq 25$	$C \leq 0,22$	$C_{E\text{ IIW}} \leq 0,45$
$S \leq 37$	$C \leq 0,22$	$C_{E\text{ IIW}} \leq 0,41$

„Vzhledem k tomu, že potřebnou výšku teploty předehřevu pro zamezení vzniku studených trhlin ovlivňují kromě chemického složení oceli také obsah difusního vodíku a tuhost konstrukce je výhodné se o nutnosti použití předehřevu přesvědčit výpočtem podle rovnic.“ [2]

„Dohřev svarových spojů není s výjimkou svařování velkých tloušťek materiálů a při nízkých obsazích difusního vodíku nutný. Teplotu interpass obvykle u svarových spojů uhlíkových ocelí nepředepisujeme.“ [2]

Jelikož je tloušťka pracovního vzorku $t = 12$ mm nebylo třeba použití předehřevu.

2.5 Vady ve svarech

„Vady ve svarech je nutno považovat za nebezpečné koncentrátoři napětí, které zvláště nepříznivě ovlivňují velikost meze únavy. Vady se mohou stát iniciátory lomu a způsobit vyřazení součásti z provozu.

Podle tvaru rozlišujeme ve svarech vady

- bodové
mikropóry, příp. malé sférické vměstky (např. silikáty)
- plošné
trhliny, mikrotrhliny, studené spoje, příp. neprůvary, nespojitosti návaru se základním materiálem (neprůvar v rovině souběžné s povrchem)
- prostorové
plynové dutiny (bublínky, póry), vměstky (struskové, tavidlové, lidické, kovové), staženiny (mezidendritické, kráterové)

Podle polohy vad ve svaru rozlišujeme vady

- povrchové
trhliny, mikrotrhliny, studené spoje, případně neprůvary, neprovařený kořen, póry

- vnitřní
plynové dutiny, staženiny, vměstky, studený spoj (mezi vrstvami housenek, ale i mezi základním materiálem a svarovým kovem), neprůvar v kořeni (u oboustranného nebo koutového svaru)

Základní nedestruktivní metody kontroly jakosti svaru

Ke zjišťování povrchových vad jsou vhodné metody:

- vizuální VT
- penetrační PT
- magnetická prášková MT
- vířivé proudy ET

Vnitřní vady se zjišťují metodami:

- radiologickými (prozařovacími) RT
- ultrazvukovými UT“ [3]

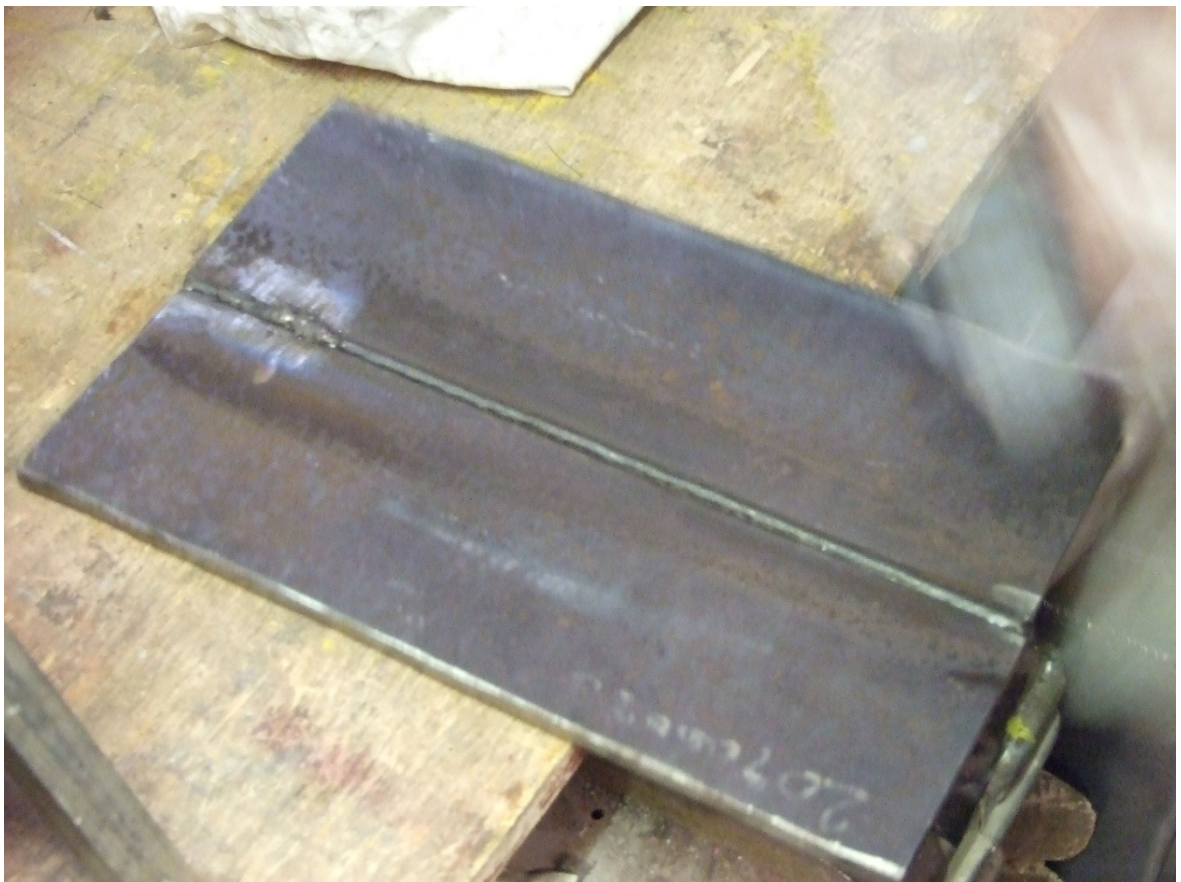
3 Praktická část

3.1 Pracovní vzorek

Pracovní vzorek (viz.obr.2.1) byl poskytnut firmou pro výrobu ocelových konstrukcí. Byl svařen nejvíce používanou metodou svařování 135 a na tomto vzorku byly provedeny a dokumentovány NDT zkoušky za účelem ověření kvality svarového spoje.

Informace o pracovním vzorku:

- materiál S355 JR (uhlíková ocel),
- rozměry: $t = 12 \text{ mm}$; $l = 350 \text{ mm}$,
- metoda svařování 135 (MAG),
- elektroda: G35:1 – 0,8 mm,
- výška svaru 14 – 15 mm.



Obr. 2.1: Kořen pracovního vzorku

Pro hodnocení citlivosti a porovnání bylo na pracovním vzorku použito 5 NDT zkoušek. Byla použita vizuální kontrola VT, následně na to byly použity dvě metody k ověření povrchových vad a to penetrační PT a magnetická prášková MT metoda. Posledními dvěma metodami byli zjišťovány vnitřní vady a těmi jsou prozařovací (radiologická) RT a ultrazvuková UT metoda.

3.2 Vizuální metoda (VT)

„Vizuální kontrola je nejjednodušší nedestruktivní kontrolou, zjišťující zjevné povrchové vady (nepřípustné nerovnoměrnosti, převýšení svaru, zápaly, trhliny, studené spoje, vady kořenové oblasti) a ověřuje splnění podmínek stavu povrchu pro další předepsanou nedestruktivní kontrolu.“ [3]

Pro vzorek byla použita metoda:

- přímá
„kontrola se provádí pouhým okem, nebo pomocí lupy při zvětšení 3 až 6x. Metodu lze použít pouze na dostupném povrchu. Požadavkem je dobrá zraková schopnost pracovníka ověřená oftalmologem (testem zrakové rozlišitelnosti) a dostatečné osvětlení denním světlem, nebo bílým umělým světlem o intenzitě minimálně 350 luxů (doporučené min. osvětlení je 500 luxů), úhel pozorování minimálně 30° od roviny kontrolovaného povrchu“ [3]

VT normy:

Provádění vizuální kontroly zkoušeného vzorku proběhlo dle normy ČSN EN ISO 17637 → Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů.

Vyhodnocování vizuální kontroly zkoušeného vzorku proběhlo dle normy ČSN EN ISO 5817 → Svařování – Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) – Určování stupňů kvality.

Postup:

Za pomoci dostatečného světla 730 lux se provedla zkouška. Pozorovací vzdálenost byla 400 – 500 mm. Za použití měrky viz obr. 3.1 se změří převýšení kořene, zápaly, vruby atd. S pomocí lupy se následně zjistí výskyt případných vad.



Obr. 3.1: Měrka sloužící k měření rozměrů vad při vizuální kontrole

Závěr:

Při provádění vizuální kontroly svaru byly zjištěny nepřipustné vady, které nevyhovují podle ČSN EN ISO 5817 B. Všechny vady jsou dokumentovány v tabulce (viz.tab.4). Všechny údaje se zapisují do protokolu o vizuální zkoušce (viz. **příloha 1**). Příklad vady 517 (viz.obr.3.2)→ pracovní vzorek **NEVYHOVĚL**.

Číslo	Referenční číslo dle ISO 6520 – I	Název vady	Poznámky	t	Mezní hodnoty vad pro stupně kvality		
					D	C	B
1.1	5011	Souvislý zápal	Je požadován plynulý přechod	0,5 až 3	Krátké vady: $h \leq 0,2 \text{ t}$	Krátké vady: $h \leq 0,1 \text{ t}$	Nepřípustné
1.2	5013	Vruby v kořeni	Je požadován plynulý přechod	0,5 až 3	$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,1 \text{ t}$	Krátké vady: $h \leq 0,1 \text{ t}$	Nepřípustné
1.3	504	Nadměrné převýšení kořene		0,5 až 3	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,6 \text{ b}$	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,3 \text{ b}$	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,1 \text{ b}$
1.4	506	Přetěčení		$\geq 0,5$	$h \leq 0,2 \text{ b}$	Nepřípustné	Nepřípustné
1.5	517	Vadné napojení		$\geq 0,5$	Přípustné Mezní hodnota závisí na druhu vady způsobené napojení	Nepřípustné	Nepřípustné



Obr. 3.2: Detekce vady č. 517 (vadné napojení) viz. tab. 2.

3.3 Penetrační metoda (PT)

„Vzhledem k fyzikálnímu principu penetračních zkoušek lze jimi zjišťovat pouze vady, které bezprostředně souvisí s povrchem zkoušené součásti a jsou na povrchu otevřené, aby do nich mohla vniknout detekční kapalina. Při kontrole svarových spojů jde příkladně o zjišťování povrchových trhlin, studených spojů, zápalů a pórů, případně hodnocení těsnosti svarů malých tlouštěk. Zjištění uzavřených (nebo dokonce vnitřních) vad těmito metodami není možné.“ [3]

„Podstatou penetračních metod je použití vhodné, kapilárně aktivní (tj. o nízkém povrchovém napětí) kapaliny, která pronikne do necelistvosti (vady). Po odstranění jejího

přebytku z povrchu zkoušeného předmětu vzlíná kapalina z necelistvosti vlivem kapilárních sil do nanesené vývojky, takže se necelistvost zviditelní.“ [3]

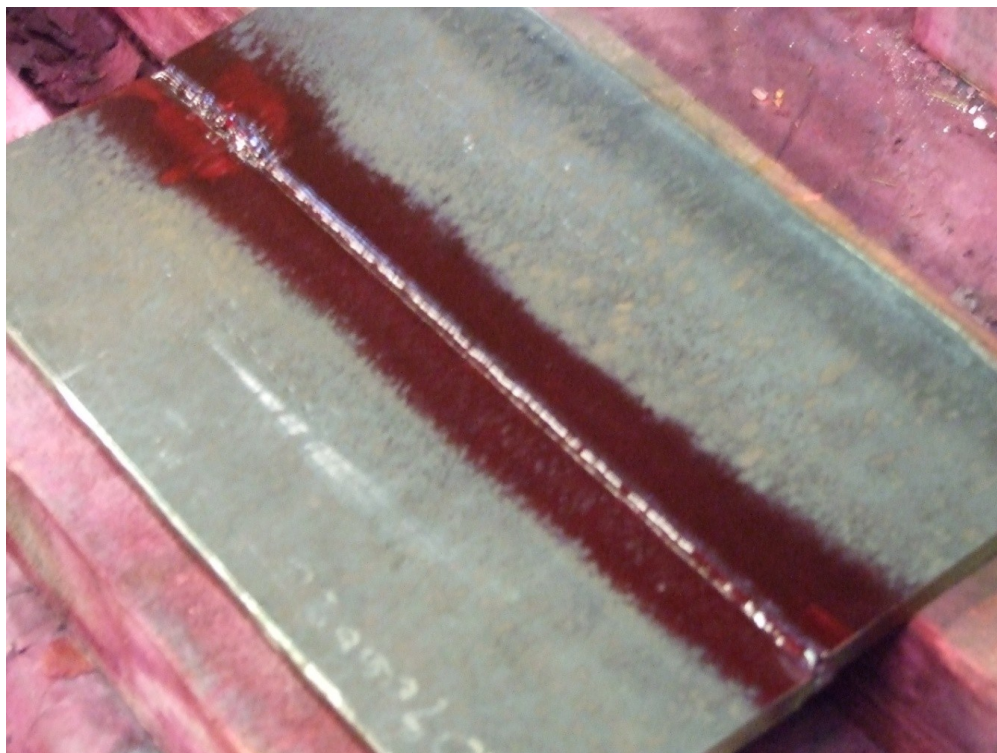
PT normy:

Provádění penetrační kontroly pracovního vzorku proběhlo dle normy ČSN EN ISO 3452 - 1 → Nedestruktivní zkoušení –Kapilární zkouška.

Vyhodnocování penetrační kontroly pracovního vzorku proběhlo dle normy ČSN EN ISO 23277 st.1 → Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení svarů kapilární metodou - Stupně přípustnosti

Postup:

Po očištění zkušebního vzorku ocelovým kartáčem a odmašťovačem se aplikuje penetrant (fluorescenční barva ve spreji) viz. obr. 4.1.



Obr. 4.1: Aplikace penetrantu na očištěný pracovní vzorek

Penetrant se nechá působit a v dalším kroku se setře pomocí čistícího prostředku ve spreji. Aplikuje se vývojka obr. 4.2. Čeká se na zvýraznění povrchových vad.



Obr. 4.2: Aplikace vývojky na zkušební vzorek

Závěr:

Penetrační metodou nebyly zjištěny žádné nepřípustné indikace. Vše je shrnuto v protokolu (viz. **příloha 2**) → pracovní vzorek **VYHOVĚL**.

3.4 Magnetická prášková metoda (MT)

„Tato metoda slouží podobně jako metoda penetrační ke zjišťování povrchových necelistvostí. Navíc umožňuje zjistit i necelistvosti, ležící těsně pod povrchem, tedy s povrchem přímo nespojené. Neklade takové nároky na přípravu zkoušeného povrchu a jeho čistotu, necelistvosti mohou být i vyplněny nemagnetickým materiálem. Určitým omezením je, že touto metodou lze zkoušet pouze materiály feromagnetické (magnetické), tedy oceli obvyklé jakosti. Nehodí se pro zkoušení materiálů paramagnetických, jako jsou vysokolegované oceli austenitického typu a neferomagnetické kovy a jejich slitiny (hliník, měď apod.).“ [3]

„Metoda je založena na skutečnosti, že ve zmagnetizovaném feromagnetickém materiálu se v místě necelistvosti, nebo náhlé změny magnetických vlastností, zvýší magnetický odpor, který způsobí deformaci šířícího se magnetického pole, běžně označovanou jako rozptyl.“ [3]

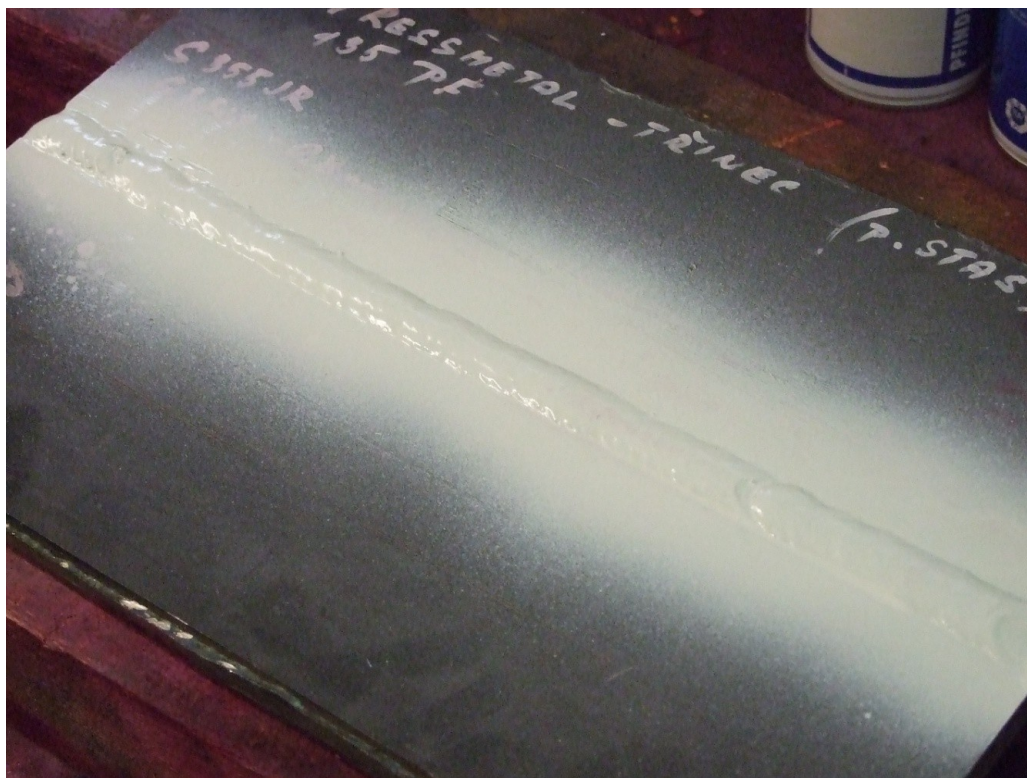
MT normy:

Provádění magnetické kontroly pracovního vzorku proběhlo dle normy ČSN EN ISO 17638 → Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení magnetickou metodou práškovou.

Vyhodnocování magnetické kontroly pracovního vzorku proběhlo dle normy ČSN EN ISO 23278 → Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení svarů magnetickou metodou práškovou – Stupně přípustnosti.

Postup:

Po očištění ocelovým kartáčem se aplikuje základová bílá barva ve spreji viz. obr. 5.1.



Obr. 5.1: Aplikace bílého základu na povrch svaru

Po zaschnutí bílého nástriku se následně použije sprej, který obsahuje olej s kovovým práškem za působení magnetu viz. obr. 5.2. Kovový prášek zvýrazní vadu (nehomogenitu) čímž dokáže odhalit přítomnost vady.



Obr. 5.2: Použití spreje s olejem s kovovým práškem za účinku působení magnetu

Závěr:

Magnetickou metodou nebyly odhaleny žádné nepřípustné vady. Vše je shrnuto v protokolu (viz. **příloha 3**) → pracovní vzorek **VYHOVĚL**.

3.5 Prozařovací (radiologická) metoda (RT)

„Princip prozařovacích metod spočívá v interakci použitého pronikavého záření (RTG, gama, urychlovačů) s hmotou kontrolovaného výrobku a v následném zviditelnění prošlého záření za kontrolovaným výrobkem vhodným detektorem.“ [3]

„Radiografie je nejrozšířenější metodou kontroly prozařováním. Je založena na principu zachycení účinku prošlého záření kontrolovaným předmětem na speciální fotografický film, čímž se získá trvalý záznam obrazu vnitřních nehomogenit (vad) výrobku tzv. radiogram. Výhodou radiografie je získání dokumentárního radiogramu v podobě stínového obrazu s dobrou rozlišitelností vad, který lze archivovat. Nevýhodou je, že radiogram je možno hodnotit až za určitou dobu, nutnou pro zpracování filmu v temné komoře, což kontrolu prodlužuje.“ [3]

RT normy:

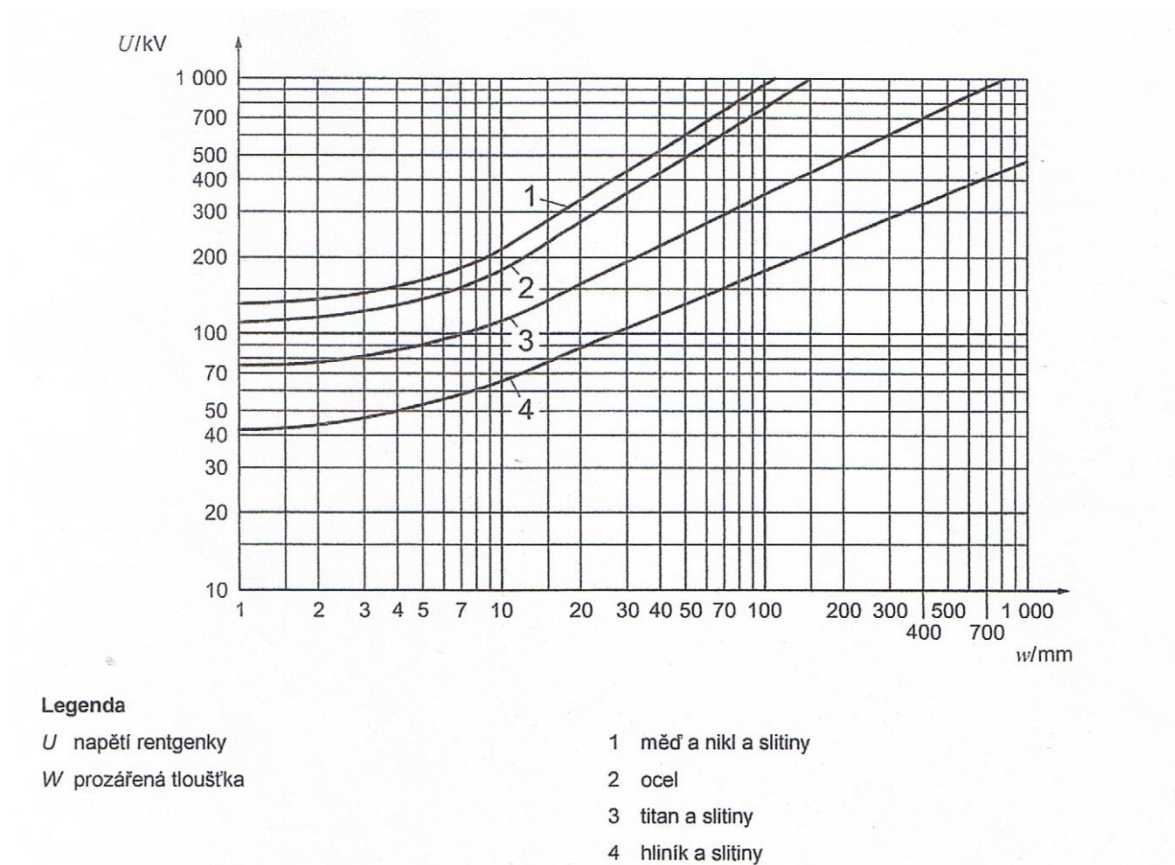
Provádění prozařovací kontroly zkoušeného vzorku proběhlo dle normy ČSN EN ISO 17636 - 1 → Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení – Část 1: Metody rentgenového a gama záření využívající film.

Vyhodnocování prozařovací kontroly zkoušeného vzorku proběhlo dle normy ČSN EN ISO 10675 - 1 → Nedestruktivní zkoušení svarů – Kritéria přípustnosti pro radiografické zkoušení - Část 1: Ocel, nikl, titan a jejich slitiny.

Postup:

K provedení zkoušky byl použit přístroj Andrex Smart 200.

Pro pracovní vzorek (materiál S355 JR) o délce 350 mm se zvolí fokus (vzdálenost čočky lampy od filmu) dle normy ČSN EN 1435 → 700 mm. Dále podle této normy se zjišťuje velikost napětí na rentgence viz. obr. 6.1.



Obr. 6.1: Volba napětí na rentgence a zdroj záření [5]

Z obrázku viz. obr. 6.1 je vidět, že při velikosti prozařované tloušťky $t = 15$ mm se volí napětí rentgenky $U = 160$ kV.

Nyní se zjistí, jak dlouhou dobu se bude prozařovat pracovní vzorek na rentgenový film (expoziční doba), za pomoci tabulky (viz. obr. 6.2).

f	4mm	5mm	6mm	7mm	8mm	9mm	10mm	12mm	14mm	16mm	16mm	18mm	20mm
cm	100	100	120	120	120	140	140	160	160	160	180	180	200
20	0,20	17	24	15	21	11	13	10	13	19	10	13	11
22	0,24	20	29	19	26	13	16	12	16	23	12	16	13
24	0,28	24	34	22	31	15	19	14	19	27	14	19	15
26	0,33	28	40	26	36	18	22	17	23	32	17	22	18
28	0,39	33	46	30	42	21	26	19	26	37	19	26	21
30	0,44	37	53	35	48	24	29	22	30	43	22	29	24
32	0,51	42	61	39	55	27	33	25	34	49	25	33	27
34	0,57	48	69	45	62	31	38	29	39	55	29	38	31
36	0,64	54	77	50	69	35	42	32	44	61	32	42	35
38	0,71	60	86	56	77	39	47	36	48	68	36	47	39
40	0,79	66	95	62	85	43	52	40	54	76	40	52	43
42	0,87	73	105	68	94	47	57	44	59	84	44	57	47
44	0,96	80	115	75	103	52	63	48	65	92	48	63	52
46	1,04	88	125	82	113	56	69	52	71	100	52	69	56
48	1,14	96	137	89	123	61	75	57	77	109	57	75	61
50	1,23	104	148	96	133	67	81	62	84	119	62	81	67
52	1,34	112	160	104	144	72	88	67	91	128	67	88	72
54	1,44	121	173	112	156	78	95	72	98	138	72	95	78
56	1,55	130	186	121	167	84	102	77	105	149	77	102	84
58	1,66	140	199	130	179	90	110	83	113	159	83	110	90
60	1,78	149	213	139	192	96	117	89	121	171	89	117	96
62	1,90	159	228	148	205	103	125	95	129	182	95	125	103
64	2,02	170	243	158	218	109	133	101	138	194	101	133	109
66	2,15	181	258	168	232	116	142	108	146	207	108	142	116
68	2,28	192	274	178	247	123	151	114	155	219	114	151	123
70	2,42	203	290	189	261	131	160	121	165	232	121	160	131
72	2,56	215	307	200	276	138	169	128	174	246	128	169	138
74	2,70	227	325	211	292	146	178	135	184	260	135	178	146
76	2,85	240	342	222	308	154	188	143	194	274	143	188	154
78	3,00	252	361	234	324	162	198	150	204	288	150	198	162
80	3,16	265	379	247	341	171	209	158	215	303	158	209	171

Obr. 6.2: Tabulka pro zjištění expoziční doby

Je znám fokus $f = 70$ cm, převýšení kořene 15 mm. Z tabulky (obr. 6.2) se odečte expoziční doba pro výšku kořene 14 mm a 16 mm, tomu odpovídá expoziční doba 198 s \Rightarrow 200 s \Rightarrow 3m 20s. Všechny známé údaje se nastaví do řídicího panelu lampy Andrex smart 200 (viz. obr. 6.3).



Obr. 6.3: Zadané údaje na řídicím panelu pro lampu Andrex smart 200

Po prozáření pracovního vzorku na RTG film (Structurix D5) se film vyvolá v černé komoře. Za pomoci negatoskopu je rentgenový film změřen na zčernání pomocí přístroje MD 10 Digitální denzitometr (viz. obr. 6.4).



Obr. 6.4: Zařízení pro změření zčernání rentgenového filmu

Po změření zčernání = 2,7 se musí ověřit kvalita filmu za pomoci měrek umístěných na pracovním vzorku (viz. obr. 6.5). Měrky určují kvalitu radiogramu (rentgenového snímku). Měrka obsahuje několik drátků (vždy 7 drátků). Jakost obrazu je dána průměrem viditelného nejtenčího drátku. Jakost radiogramu je dána normou ČSN EN 1435. Pro tento případ, kterým je tloušťka pracovního vzorku 12 mm je nutné vidět drátek s označením W14.



Obr. 6.5: Měrky a olověná písmena na pracovním vzorku

Po ověření kvality rentgenového snímku a splnění všech předchozích kroků se snímek vyhodnotí za pomoci negatoskopu. Na prosvíceném snímku jsou vidět všechny vnitřní vady ve svaru (viz obr. 6.6 a 6.7).

Závěr:

Při provádění prozařovací (radiologické) kontroly svaru byly objeveny vady, které podle ČSN EN ISO 10675 – 1 nelze označit jako přípustné. Všechny vady jsou zaneseny do tabulky (viz. tab. 5). Všechny údaje o provádění kontroly jsou vneseny do protokolu (viz. příloha 4). → pracovní vzorek **NEVYHOVĚL**.



Obr. 6.6: Rentgenový snímek (levá část)



Obr. 6.7: Rentgenový snímek (pravá část)

Tabulka 5: Stupně přípustnosti pro vnitřní indikace u tupých svarů [6]

Č	Druhy vnitřních vad podle EN ISO 6520 - 1	Stupeň přípustnosti 3 ^a	Stupeň přípustnosti 2 ^a	Stupeň přípustnosti 1
2b	Rovnoměrná pórovitost a bublina (2012, 2011) Více vrstev	$A \leq 2,5 \%$ $d \leq 0,4s, \text{max. } 5\text{mm}$ $L = 100 \text{ mm}$	$A \leq 1,5 \%$ $d \leq 0,3s, \text{max. } 4\text{mm}$ $L = 100 \text{ mm}$	$A \leq 2 \%$ $d \leq 0,2s, \text{max. } 3\text{mm}$ $L = 100 \text{ mm}$
3 ^b	Shluk pórů (2013)	$A \leq 16 \%$ $d \leq 0,4s, \text{max. } 4\text{mm}$ $L = 100 \text{ mm}$	$A \leq 8 \%$ $d \leq 0,3s, \text{max. } 3\text{mm}$ $L = 100 \text{ mm}$	$A \leq 4 \%$ $d \leq 0,2s, \text{max. } 2\text{mm}$ $L = 100 \text{ mm}$
5 ^d	Protáhlý pór (2015) a červovitý (2016)	$h < 0,4s, \text{max. } 4\text{mm}$ $\Sigma I \leq s, \text{max. } 75\text{mm}$ $L = 100 \text{ mm}$	$h < 0,3s, \text{max. } 3\text{mm}$ $\Sigma I \leq s, \text{max. } 50\text{mm}$ $L = 100 \text{ mm}$	$h < 0,2s, \text{max. } 2\text{mm}$ $\Sigma I \leq s, \text{max. } 25\text{mm}$ $L = 100 \text{ mm}$
9	Kovové vměstky (304) (kromě mědi)	$I \leq 0,4s, \text{max. } 4 \text{ mm}$	$I \leq 0,3s, \text{max. } 3 \text{ mm}$	$I \leq 0,2s, \text{max. } 2 \text{ mm}$
11 ^e	Studený spoj (3042)	Přípustné, ale jen přerušovaný a nevystupující na povrch $\Sigma I \leq 25\text{mm}, L=100\text{mm}$	Nepřípustné	Nepřípustné
14a	Zápal, souvislý a nesouvislý (5011, 5012)	Požaduje se plynulý přechod Pro $t > 3 \text{ mm}$ $h \leq 0,2 t, \text{max. } 1 \text{ mm}$ Pro $0,5 \text{ mm} \leq t \leq 3\text{mm}$ $I \leq 25 \text{ mm}, h \leq 0,2 t$	Požaduje se plynulý přechod Pro $t > 3 \text{ mm}$ $h \leq 0,2 t, \text{max. } 1 \text{ mm}$ Pro $0,5\text{mm} \leq t \leq 3\text{mm}$ $I \leq 25 \text{ mm}, h \leq 0,2 t$	Požaduje se plynulý přechod Pro $t > 3 \text{ mm}$ $h \leq 0,2 t, \text{max. } 1 \text{ mm}$ Pro $0,5\text{mm} \leq t \leq 3\text{mm}$ $I \leq 25 \text{ mm}, h \leq 0,2 t$
14b	Vruby v kořeni (5013)	Požaduje se plynulý přechod Pro $t > 3 \text{ mm}$ $I \leq 25 \text{ mm}$ $h \leq 0,2 t, \text{max. } 2 \text{ mm}$ Pro $0,5 \text{ mm} \leq t \leq 3\text{mm}$ $h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,1 t$	Požaduje se plynulý přechod Pro $t > 3 \text{ mm}$ $I \leq 25 \text{ mm}$ $h \leq 0,1 t, \text{max. } 1 \text{ mm}$ Pro $0,5\text{mm} \leq t \leq 3\text{mm}$ $h I \leq 25 \text{ mm}, h \leq 0,1 t$	Požaduje se plynulý přechod Pro $t > 3 \text{ mm}$ $I \leq 25 \text{ mm}$ $h \leq 0,05t, \text{max. } 0.5\text{mm}$ Pro $0,5\text{mm} \leq t \leq 3\text{mm}$ nepřípustné
15a	Nadměrné převýšení kořene (504) $0,5 \text{ mm} \leq t \leq 3 \text{ mm}$	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,6 b$	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,3 b$	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,1 b$

3.6 Ultrazvuková metoda (UT)

„Zkoušení materiálů ultrazvukem je založeno na šíření akustického vlnění zkoušeným předmětem a registraci změn, vyvolaných ve zkoušeném prostředí jeho interakcí na rozhraní mezi dvěma prostředími s rozdílnými akustickými vlastnostmi, tj. homogenním prostředím materiálu a heterogenitou (vada – bublina, vměstek, trhлина apod.).“ [3]

„Podstatou akustických metod obecně jsou elastické kmity látky, které se šíří od místa k místu rychlostí, závislou na mechanických vlastnostech prostředí a nepřesahují rámec plastické deformace.“ [3]

UT normy:

Provádění ultrazvukové kontroly pracovního vzorku proběhlo dle normy ČSN EN ISO 17640 → Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení ultrazvukem – Techniky, třídy a hodnocení.

Vyhodnocování ultrazvukové kontroly pracovního vzorku proběhlo dle normy ČSN EN ISO 11666 → Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení ultrazvukem – Stupně přípustnosti.

Postup:

Použitý přístroj Olympus EPOCH 600.

Prvním krokem je očistit povrch pracovního vzorku. Na povrchu se vytvoří vazba mezi sondou a povrchem vzorku. Sondy detekují velikost a hloubku vad nacházejících se ve svaru. Chyba se promítne na obrazovce s grafem na přístroji viz. obr. 7.1.



Obr. 7.1: Detekce chyby ultrazvukem

Závěr:

Při provádění ultrazvukové kontroly svaru byla objevena vada, kterou podle ČSN EN ISO 11666 st.2 nelze označit jako přípustnou. Údaje o kontrole jsou zapsány do protokolu (viz. **příloha 5**). → pracovní vzorek **NEVYHOVĚL**.

Nevyhovující indikace byla objevena v hloubce 4 - 6 mm ve vzdálenosti 30 – 75 mm od zadané nuly na vzorku. Pravítko lze vidět na obr 6.5. Indikace odpovídá póru.

Při srovnání metod prozařovací a ultrazvukovou se dojde k závěru, že RT metoda byla při zkoušení vzorku citlivější a odhalila více indikací oproti metodě UT.

Závěr

V bakalářské práci jsem se věnoval kontrolám NDT na pracovním vzorku (ocel S355 JR), který měl představovat ocelovou konstrukci prováděnou podle pravidel normy ČSN EN 1090-2.

V teoretické části jsem uvedl základní problematiku normy ČSN EN 1090-2. Dále jsem z normy uvedl časové prodlevy, které se musí dodržet před prvním zkoušením a rozsah kontrol, které se musí provést pro různé svarové spoje. Jelikož pracovní vzorek je uhlíková ocel, uvedl jsem studii o svařitelnosti uhlíkové oceli. Jako posledním krokem v teoretické části práce jsem vysvětlil druhy povrchových i vnitřních vad a uvedl metody zkoušení.

V praktické části jsem se zaměřil na pracovní vzorek a jeho zkoušení na povrchové a vnitřní vady. Jako první byla provedena vizuální kontrola za pomoci měrky, lupy a dostatečně silného umělého světla. Vzorek vizuální zkouškou neprošel a proto musel být prozkoušen na povrchové vady za využití penetrační a magnetické práškové metody. Těmito metodami nebyly odhaleny žádné nebezpečné vady a proto vzorek v těchto zkouškách vyhověl. Jako posledním krokem bylo prozkoušet vzorek na vnitřní vady. K tomu byly použity metody prozařovací (radiologické) a ultrazvukové. Prozařovací (radiologickou) zkouškou bylo odhaleno 8 nepřipustných vad a vzorek z tohoto důvodu nevyhověl. Ultrazvukovou metodou byla odhalena jedna vada v hloubce 4-6 mm a proto nevyhovující. Pokud srovnáme tyto dvě metody je vidět, že prozařovací metoda prokázala výskyt většího počtu vad než metoda ultrazvuková a proto pro zkoušení tohoto vzorku byla prozařovací metoda citlivější.

Poděkování

Tímto bych chtěl především poděkovat mému vedoucímu Ing. Martinu Sondelovi, Ph. D. za podporu, pomoc a užitečné rady při vypracovávání bakalářské práce. A mé veliké poděkování za poskytnutí prostoru k uskutečnění potřebných testů k vypracování praktické části práce patří řediteli firmy ND test panu RNDr. Leoši Havránkovi a také dvěma pracovníkům této firmy Lukáši Onderkovi a Janu Kláskovi za informace a provedení kontrol na pracovním vzorku.

Použitá literatura

- [1] ČSN EN 1090-2+A1. *Provádění ocelových konstrukcí a hliníkových konstrukcí: Část 2: Technické požadavky na ocelové konstrukce*. Leden 2012.
- [2] KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír; HAJDÍK Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*. Vyd. 1. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., VŠB-Technická Univerzita, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [3] KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2005. 136 s. ISBN 80-248-0870-6.
- [4] ČSN EN ISO 5817. *Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování): Určování stupňů kvality*. Leden 2008.
- [5] ČSN EN ISO 17636-1. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení: Část 1: Metody rentgenového a gama záření využívající film*. Září 2013.
- [6] ČSN EN ISO 10675-1. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Kritéria přípustnosti pro radiografické zkoušení: Část 1: Ocel, nikl, titan a jejich slitiny*. Březen 2014.

Seznam příloh

Příloha č. 1 ... Protokol vizuální zkoušky VT

Příloha č. 2 ... Protokol penetrační zkoušky PT

Příloha č. 3 ... Protokol magnetické práškové zkoušky MT

Příloha č. 4 ... Protokol prozařovací (radiologické) zkoušky RT

Příloha č. 5 ... Protokol ultrazvukové zkoušky UT